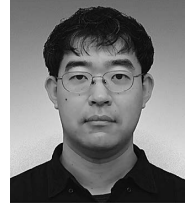


衝突の痕跡か？ 銀河団のクールコア中に 見つかった渦巻構造



上田

上田 周太郎^{*1}・北山 哲^{*2}・堂谷 忠 靖^{*3}

〈*1 宇宙科学研究所／宇宙航空研究開発機構 〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: suedata@astro.isas.jaxa.jp

〈*2 東邦大学 〒274-8510 千葉県船橋市三山 2-2-1〉

〈*3 宇宙科学研究所／宇宙航空研究開発機構 〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1〉

多くの銀河団の中心領域には、周囲に比べて低温の電離ガスが存在している。その領域はクールコアと呼ばれ、大きさは典型的には100 kpc程度である。クールコアがどのように形成され、なぜ安定して存在し、大きさは何で決まっているのか、20年以上も論争が続いている。われわれはこの問題に立ち向かうべく、クールコアをもつ十分緩和した銀河団の典型として考えられてきたAbell 1835銀河団に着目した。われわれはX線天文衛星 *Chandra* の長時間観測のデータを元に、独自の手法で表面輝度の平均成分をモデル化し差し引くことで、大きさが70 kpcの渦巻構造を残差画像の中に見つけた。渦巻は残差に対し超過している領域と、不足している領域から構成されている。X線スペクトル解析から超過領域と不足領域の高温ガスの温度差が1,500万度程度あることが明らかになり、さらに圧力平衡かそれに近い状態であることがわかった。これらは質量の大きな差のある銀河団の衝突により、中心部の暗黒物質が揺り動かされ、その運動に銀河団高温ガスが引きずられて動くガススロッシング現象が起きていることを示唆する。渦巻はクールコア内から外側の高温領域まで伸びている。より高温のガスがクールコアに流入することで、クールコアの安定化に寄与していると考えられる。

1. はじめに

銀河団ほどX線天文学の誕生の前後で描像が変わった天体はないのではないだろうか。系統的な銀河団のX線観測研究は、世界初のX線天文衛星 *Uhuru* が銀河団方向から到来してくるX線を捉え、しかもその放射が空間的に拡がっていることを明らかにしたところから始まる。ロケット実験などによりそのX線の中に高階電離した鉄イオンのK輝線が含まれていることが判明し、放射が熱的であることが明らかになった¹⁾。高階電離した鉄イオンのK輝線は温度 10^{7-8} Kの光学的に薄いプラズマからよく放射される。数十から数千個の

銀河が密集した領域は、重力的に束縛された銀河団高温ガスで満たされていることがわかった。この驚きの観測事実は、人類が長年にわたり可視光観測に基づいて築き上げてきた天文学の常識を変革させた。

銀河団高温ガスの発見のインパクトは大きく、暗黒物質の存在の確立にも寄与している。銀河団高温ガスからのX線は、そのほとんどがクーロン散乱により生じる熱的制動放射起源であるため、放射領域の大きさとX線光度からガスの質量を容易に推定できる。観測される銀河団高温ガスの質量は、典型的には全銀河の質量よりも5倍程度大きい。銀河団高温ガスを重力的に束縛するために

は銀河とガス自身の質量だけでは全く足りず、さらにそれらの5倍程度の未知の重力源が必要となる。未知の重力源、今日ではそれは暗黒物質であろうと考えられている。

では、銀河団はどのように誕生したのだろうか？ 銀河団はより小さな銀河団同士の衝突・合体により成長してきたと考えられている。今日の銀河団は太陽質量の 10^{15} 倍を超える巨大なものも存在する。しかし完全に進化しきった天体ではなく、宇宙の構造形成がまさに現在進行している現場であり、宇宙の進化についても重要な情報源となる天体である²⁾。その進化の過程を明らかにするうえで銀河団高温ガスの観測は欠かすことができない。

2. 銀河団中心領域

銀河団高温ガスのX線表面輝度分布は、軸対称で強い中心集中の構造をもつことが多い。このような空間構造をもつ銀河団は、長年衝突を経験していない、十分緩和した銀河団だと考えられてきた。銀河団高温ガスの密度は中心に向かうほど大きくなる。そのようなガスの温度は、100 kpc程度以下を境に中心に向かって下がっていく傾向が見られている。低温の電離ガスが存在する領域はクールコアと呼ばれていて、X線放射により冷えた電離ガスによって形成されていると考えられている。ガスの密度と銀河団の年齢を考えると本来なら冷え切ってしまうにもかかわらず、どの銀河団でもクールコアの温度は数千万度で安定して下げ止まっている^{3), 4)}。放射冷却の無視できない領域でなぜガスの温度が安定して下げ止まっているのか？ この問題は、銀河団研究において20年以上も議論が続いているクーリングフロー問題と深く関係している。天文月報にこの問題の背景が詳細に述べられた記事がでていたので、興味のある方はそちらを参照していただきたい⁵⁾。また、クールコアのサイズがどのような物理で決まっているのかもよくわかっていない。クールコアのサ

イズは、観測的には数10 kpcと~100 kpcにピークをもつような分布をしている⁶⁾。しかし理論的には容易に説明できないことが知られている⁷⁾。このようにクールコアは謎の宝庫である。

電波や可視光観測においては秒角の角度分解能が当然の時代になって久しいが、X線観測で秒角を達成するのは独特な光学系ゆえになかなか難しい。現在も運用されているX線天文衛星で秒角の角度分解能を達成しているのは二つしかない。そのうちの一つ、米国のX線天文衛星 *Chandra* は、最高で0.5"の角度分解能をもつ。*Chandra* 以前、クールコアを詳細に調べられたのは、近傍の銀河団のみだったが、*Chandra* 以降、それが $z > 0.5$ の遠方の銀河団まで行えるようになった。質の高いX線画像が次々に得られるようになり、本格的なX線画像解析の時代が到来した。

3. クールコアに潜んでいた渦巻構造

われわれはクールコアの謎に迫るため、Abell 1835 銀河団に着目した。Abell 1835 銀河団は赤方偏移 $z=0.2532$ ($1''=3.97$ kpc) に位置し、全天を観測したX線天文衛星 *ROSAT* による銀河団

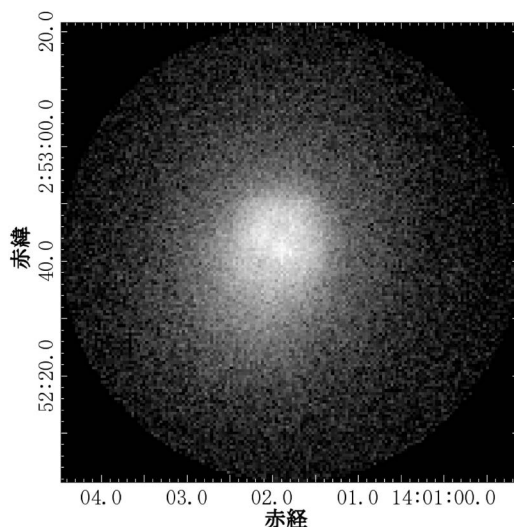


図1 *Chandra* で撮像した Abell 1835 銀河団中心領域 ($r < 40''$) の 0.4–7.0 keV 帯域の X 線画像。バックグラウンド補正と露出補正を行っている。

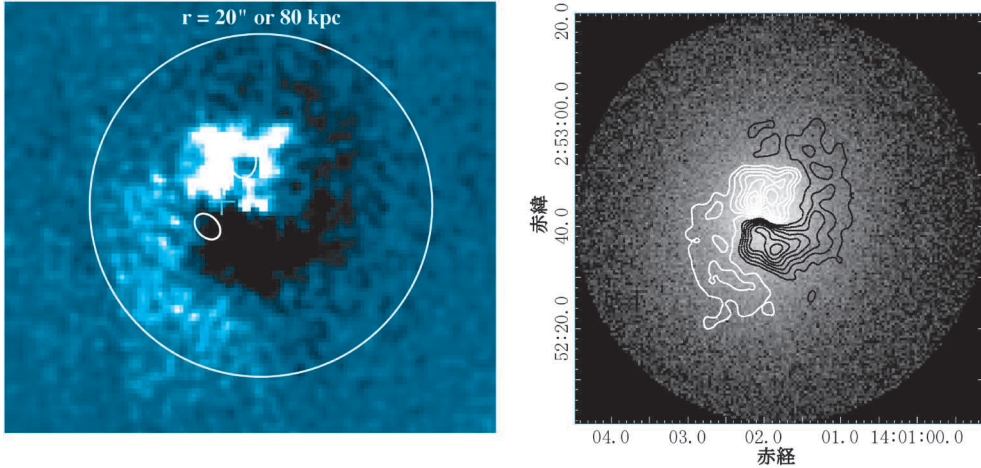


図2 左図：残差画像の中に見つかった、二つの弓状の構造。南東に伸びている構造は平均成分より明るく（図中白い部分）、北西方向に伸びている構造は、平均成分より暗い。両者は渦を巻くように存在している。二つの白色の楕円は先行研究により見つかったX線空洞の位置とサイズを示し、シアン十字は中心銀河の位置を示す。中心銀河は超過・不足領域の境界に位置しているように見える。右図：左図のそれぞれの構造の残差の最大値に対し、100, 90, …, 10%になる位置を等高線にし、図1に重ねたもの。白色の等高線が残差の超過領域の、黒色の等高線が残差の不足領域を示す。

カタログ（ROSAT Bright Cluster Sample⁸⁾）に収録されている銀河団の中で最もX線光度が大きい。つまり最大級に重く、構造形成が進んでいる銀河団である。これまでAbell 1835銀河団はクールコアをもつ十分緩和した銀河団の典型とみなされてきた。図1にAbell 1835銀河団の中心領域（ $r < 160$ kpc）のX線表面輝度分布を示す。軸対称で、中心集中の傾向が見られる。クールコアの謎に迫るために、われわれはこの一見無個性なX線表面輝度分布の中に隠された構造を探すことにした。

われわれは隠された構造を探すためにX線表面輝度分布の精密なモデル化を行うことにした。形状を再現するために楕円モデルを採用して、銀河団の生のX線表面輝度分布を最もよく再現できるパラメータを探し、そして差し引いた。すると隠された構造が浮かび上がってきた。生のX線表面輝度分布から平均成分を差し引いて得られた残差画像を図2左に示す。中心領域に弓状の構造が二つ現れた。一つは平均成分よりも超過しており（以下、超過領域）、中心から反時計回りに南の方

向に伸びている。もう一つは平均成分よりも不足しており（以下、不足領域）、中心から逆に北の方向に伸びている。これらは内側から外側に向かって渦を巻くように存在していることから、渦巻構造と呼ぶことにする。具体的なサイズや位置を明らかにするため、渦巻構造の等高線を取って元のX線表面輝度分布（図1）に重ねたものが図2右になる。渦巻は銀河団の中心領域に存在していることが見て取れる。また、超過領域と不足領域の境界に、銀河団中心銀河が位置しているように見える。われわれはこの渦巻構造のサイズを、最も超過（or不足）している領域からその残差レベルが10%になる領域までの距離として定義することにした。その結果、両方の渦巻構造のサイズは ~ 70 kpc（ $\sim 18''$ ）になり、両者ともに同程度のサイズであることがわかった。

銀河団のX線表面輝度分布の残差画像の中に渦巻構造があることを見つけたのは、残念ながらわれわれが初めてではない。先行研究により、およそ10個程度の銀河団・銀河群から渦巻構造が報告されている。例えば、ペルセウス座銀河団^{9), 10)},

Abell 85 銀河団¹¹⁾, Abell 496 銀河団¹²⁾, Abell 2029 銀河団¹³⁾, Abell 2052 銀河団¹⁴⁾ などがある。

これだけの銀河団で見つっていると、渦巻構造の起源や進化過程はよく理解されていると思われるかもしれないが、もちろん、そんなことはない。渦巻構造のある領域の銀河団高温ガスの温度や密度などについては共通項が見いだされているが、渦巻構造内やその周囲で圧力分布がどうなっているのかあまり着目されていない。渦巻の大きさの客観的な比較も行われていない。渦巻構造の起源を解明するためにはまだまだ情報が足りていない。そこでわれわれは、Abell 1835 銀河団の渦巻構造のある領域や中心領域全体の高温ガスの X 線スペクトルを取得して解析した。先行研究と比較しつつ、渦巻の起源や生成過程での周囲への影響を調べることにした。

4章と5章は少し解析の詳細に入っていく。話が難しくなったと感じられるかもしれない。6章はまとめと今後の展望を述べており、また一般的な内容に戻るため、4章と5章は飛ばして読まれても大筋は追えるようになっている。逆に、もっと解析の詳細まで知りたいという方がおられるかもしれない。その方はぜひ拙論文を見ていただきたい¹⁵⁾。

4. 渦巻領域と中心領域全体の銀河団高温ガスの性質

4.1 渦巻領域中の銀河団高温ガス

われわれは超過・不足領域から、視線方向に全積分した銀河団高温ガスの X 線スペクトルを抽出した。それぞれのスペクトルを重元素の輝線を含む熱的放射モデルを用いて解析を行ったところ、図3のような結果が得られた。それぞれの領域の間で、温度が1,500万度ほど異なるが、重元素量に有意な差は見られない。超過領域で密度*1が高くなっていることがスペクトル解析からも示さ

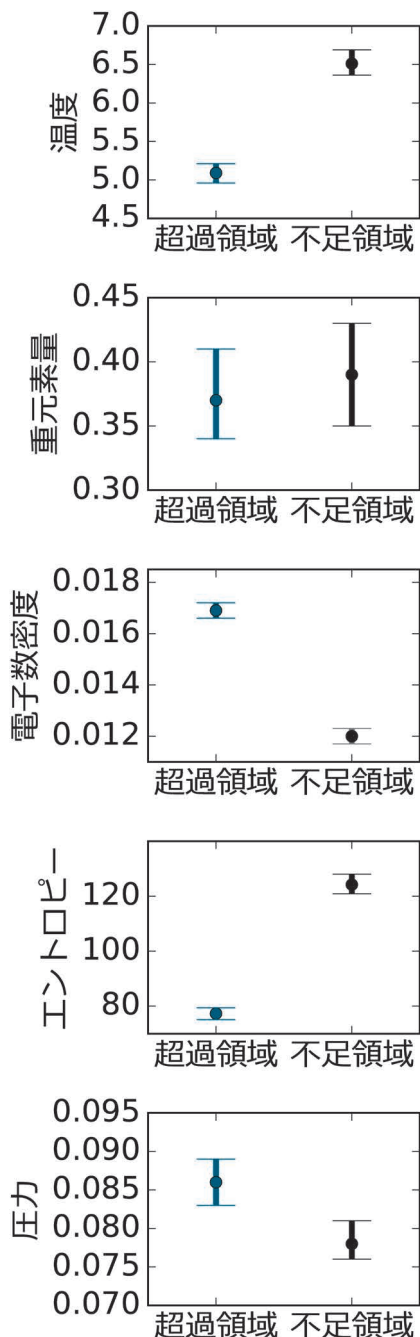


図3 超過領域と不足領域に存在する銀河団高温ガスの性質。単位はそれぞれ上から keV, solar, cm^{-3} ($L/1 \text{ Mpc}^{-1/2}$), keV cm^2 ($L/1 \text{ Mpc}^{1/3}$), keV cm^{-3} ($L/1 \text{ Mpc}^{-1/2}$)である。誤差は90%信頼区間。

*1 密度は視線方向に一様で、奥行きはLと仮定した。

れた。エントロピーは超過領域のほうが小さくなっている。注目すべきは、両方の領域で圧力にあまり差が見られない点である。超過領域と不足領域は、圧力平衡かそれに近い状態になっていることが示唆される。両方の領域の銀河団高温ガスの赤方偏移到有意な違いはなく、銀河団自体の値と整合していた。超過領域と不足領域の速度差は 600 km s^{-1} 以下であった。

超過領域のガスのほうが不足領域のガスより低温で高密度、低エントロピーという性質は、先行研究で得られている傾向と同様である。重元素量も超過領域のほうが大きいという報告がある銀河団もあるが¹²⁾。Abell 1835 銀河団ではその傾向は見られなかった。多くの共通した項目があるという事は、同じ起源である可能性を示唆している。

視線方向の速度差については上限値しか得られなかった。欧州の X 線天文衛星 XMM-Newton 搭載の軟 X 線分光器 (RGS) による Abell 1835 銀河団中心領域の観測で、輝線幅の測定から乱流的な運動に起因する速度分散の測定がなされており、上限値 274 km s^{-1} が得られている¹⁶⁾。われわれの結果はこの上限値と整合している。

4.2 中心領域全体の銀河団高温ガスの性質

つづいてわれわれは中心領域全体 ($r < 40''$, 160 kpc) の X 線スペクトル解析を行った。領域の分割には、ContBin と呼ばれる、X 線画像を元に各領域の signal-to-noise ratio (S/N) が同程度になるよう領域分けをしてくれるアルゴリズム¹⁷⁾を採用した。われわれはバックグラウンドを差し引いた後、各領域の S/N が 42 以上 (1 領域 $\sim 2,000$ 光子) になるように領域分けを行った。中心領域は 92 個に分割され、われわれは各領域それぞれでスペクトル解析を行った。

中心領域の銀河団高温ガスの温度マップと圧力マップを図 4 左と図 5 左に示す。平滑化して渦巻構造の等高線を重ねたものを、それぞれの図の右側に示す。ガスの温度は中心に向かうほど低くなっており、Abell 1835 銀河団はクールコアをも

つことがわかる。渦巻領域の等高線を重ねてみると、低温の領域は渦巻の超過領域に多数含まれていることがわかる。そのため超過領域のほうが不足領域より低温になっていると考えられる。また、圧力は中心に向かうほど高くなっていることがわかる。しかし明らかな不連続は見られない。中心領域では圧力平衡かそれに近い状態になっていることが示唆されている。そのため、超過・不足領域で明らかな差が現れていないのだろう。中心領域全体の銀河団高温ガスのスペクトルを解析すると、渦巻構造のある領域のみから抽出したスペクトルの解析結果と整合した結果が得られた。

5. 渦巻構造とクールコア

われわれは、Chandra による Abell 1835 銀河団の観測データから取得した X 線画像を詳細に解析することで、大きさが 70 kpc 程度の渦巻構造が存在することを明らかにした。銀河団高温ガスの性質について、超過・不足領域それぞれから X 線スペクトルを抽出した場合と、ContBin のアルゴリズムに従って分割した 92 領域の X 線スペクトル解析で、お互いに整合する結果が得られた。つまり、超過領域は不足領域より 1) 温度が低く、2) 密度が高く、3) したがってエントロピーは小さい。また、4) 重元素量は有意な違いが見られず、5) 圧力も明らかな差が見られない、という関係である。これらの観測結果から、渦巻構造の起源とクールコアとの関係性を議論していく。

5.1 渦巻構造のサイズ

Abell 1835 銀河団の渦巻構造のサイズは 70 kpc である。われわれは二つの方法でこのサイズのもつ意味を考察することにした。一つ目は他の銀河団で見つかった渦巻構造のサイズとの直接比較、二つ目はコア半径との比較である。渦巻のサイズは各論文でまちまちの測定結果が報告されているが、それらより Abell 1835 銀河団は 2-4 倍小さい。客観的定義を用いても結果が変わらないことを確認するため、Abell 496 銀河団、Abell 2052 銀河

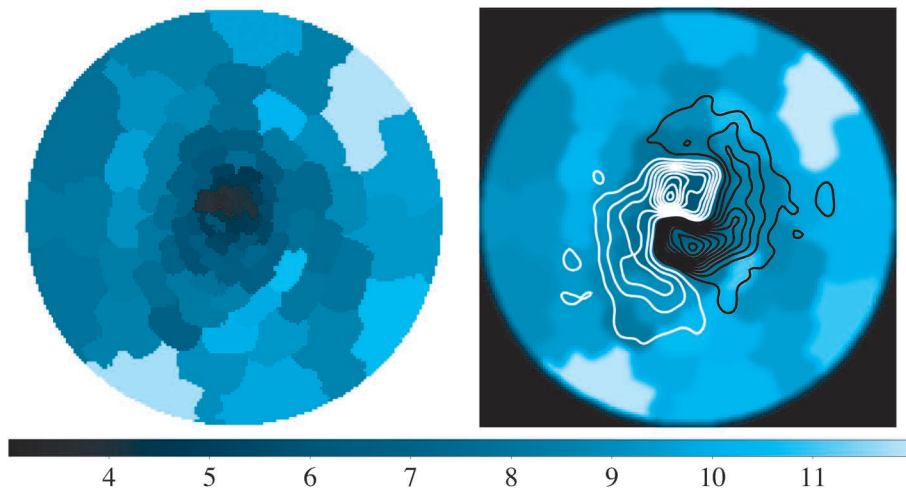


図4 ContBinによって分割された各領域内の銀河団高温ガスの温度マップ。単位はkeV。左側は実際の温度マップで、右側は7"のスケールで平滑化したイメージ。渦巻のコントアは図2右のものと同じ。温度の統計誤差は内側で7%、外側で15%。

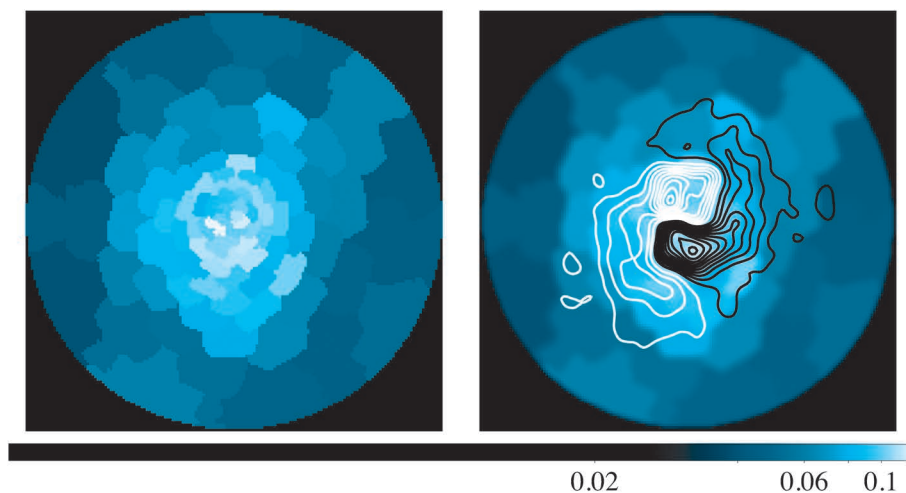


図5 図4と同じだが、こちらは圧力マップ。単位は $\text{keV cm}^{-3} (L/1 \text{ Mpc})^{-1/2}$ 。統計誤差は内側で9%、外側で16%。

団を全く同じ方法によって再解析し、それぞれ150, 170 kpcという結果を得た。先行研究での報告値より若干小さくはなったが、それでもAbell 1835銀河団が最小であるという結果は変わらない。次にコア半径のサイズとの比較であるが、Abell 496銀河団は15 kpc、Abell 2052銀河団は18 kpcと報告されている。Abell 1835銀河団は31 kpcなので、渦巻構造のサイズと明らかな相関は見られない。

Abell 1835銀河団の渦巻構造は、クールコアを超えて中心領域の低温領域と周囲の高温領域を端渡すように広がっている。スペクトル解析の結果から高温のガスがクールコア内に一部存在していることが示唆されている。つまり、渦巻構造を作り出している何らかの運動が、クールコア内の低温で高密度のガスの一部を外側の高温領域まで流出させ、逆に外側の高温領域のガスの一部をクールコア内に流入させていることを示唆する。

5.2 渦巻構造と銀河団衝突

では、なにか渦巻を作り出すのか？ 形状から回転運動に起因しているように見える。近年、数値シミュレーションの発達に伴い、銀河団同士の衝突現象から面白い示唆が得られ始めている。

数値シミュレーションから、質量に大きな差のある銀河団同士の衝突が起きたとき、銀河団の暗黒物質が作り出す重力ポテンシャルが揺り動かされることが示唆されている¹⁸⁾⁻²⁰⁾。暗黒物質の運動に連動して銀河団高温ガスも揺り動くため、中心領域にあった比較的低温で高密度のガスは外側に流出し、逆に外側の高温で低密度のガスが中心領域に流入する。この現象はガススロッシングと呼ばれる。天球面上で衝突が生じたとき、暗黒物質の回転運動も天球面上で起こる。すると銀河団高温ガスも暗黒物質の回転に連動して流出入する。流出入の量は全体に対し少量なのでX線表面輝度はあまり変化しないが、残差画像を取得すると渦巻構造が浮かび上がってくる。20倍の質量差がある銀河団の衝突でもガススロッシング現象は起きることが示されている。

Abell 1835 銀河団や他の銀河団の渦巻構造が天球面上でのガススロッシング現象により生じたとする、超過・不足領域で観測された高温ガスの性質をよく説明できる。数値シミュレーションにより渦巻構造のサイズは時間発展することが示唆されている¹⁹⁾。最もサイズの小さい渦巻構造をもつ Abell 1835 銀河団は、ガススロッシング現象が始まって間もない衝突初期段階にあるのかもしれない。ただし Abell 1835 銀河団については、4,000 万年前に中心銀河中の活動銀河核 (AGN) が爆発的活動を起こし南北それぞれにX線空洞を作ったという指摘もある²¹⁾。70 kpc という小さいサイズは、爆発的活動時の AGN からのジェットなどで銀河団高温ガスが押しやられた可能性も排除できない。AGN の可能性を排除するためには、衝突を起こしている内部構造の同定など、追加の観測が必要になる。

5.3 ガススロッシング現象とクールコア

ガススロッシング現象はクールコアの内外に影響を及ぼしていることが示されつつある。では、この現象がクールコアの形成や安定化に寄与している可能性はないだろうか？ Abell 1835 銀河団の渦巻構造のサイズは最も小さいが、中心からクールコアの外側の高温領域まで伸びている。高温の銀河団ガスが中心まで流入しており、いずれは低温の銀河団ガスと混ざるだろう。ガスの運動エネルギーもいずれは熱化するはずである。これらはクールコアに対する熱入力となるので、安定化に寄与しているのかもしれない。

クールコアの謎に迫るため、今後はガススロッシング現象の系統的調査が重要となってくるだろう。今回われわれは客観的定義を用いて三つの銀河団の渦巻構造のサイズを測定した。よりサンプルを増やすことでコア半径との相関や、他の物理量との相関が見えてくるかもしれない。一方、視線方向上にガススロッシング現象が起きている銀河団の探査も重要だろう。視線方向上に銀河団高温ガスが運動していると、ドップラー効果により速度が測定できる。銀河団高温ガスの速度場を求めることで運動エネルギーを見積もることができれば、暗黒物質の運動への制限にもつながる。現在のところ、唯一おとめ座銀河団で視線方向上のガススロッシング現象の痕跡が見られている²⁰⁾。これは視線方向上で起きることが希というわけではなく、探査が難しいことを意味しているのだろう。銀河団中心領域のより丁寧で詳細な解析によって、まだまだ隠されている構造を浮かび上がらせることができるはずだ。

6. まとめと展望

クールコアを支配する物理はいまだによくわかっていない。残念ながら本研究でも解明にまでは至っていない。しかし、手がかりはつかめたように思う。その手がかりとはガススロッシング現象だ。

クールコアをもつ十分緩和した銀河団の典型として考えられてきた Abell 1835 銀河団の中にも、ガススロッシング現象起源と考えられる渦巻構造を見つけた。その渦巻は、低温のガスが存在する中心からクールコア外の高温領域にまたがって存在している。ガススロッシング現象は銀河団同士の衝突によって生じる。落下してくる銀河団との質量差が20倍でも簡単に生じることが数値シミュレーションから示唆されている。銀河団は構造形成の過程にあり、衝突を頻繁に経験すると考えると、ガススロッシング現象による銀河団高温ガスの流出入がクールコアの形成や安定化に寄与しているかもしれない。

ガススロッシング現象はガスの回転運動を誘発する。そのため銀河団高温ガスの速度場の測定は、ガススロッシング現象のみならず衝突現象そのものの理解のために欠かすことができない。銀河団中心領域におけるガスの速度場を初めて測定したのはX線天文衛星「ひとみ」である。「ひとみ」の初期観測によるペルセウス座銀河団中心領域の観測により、銀河団高温ガスの視線方向の平均速度は $150 \pm 70 \text{ km s}^{-1}$ 、乱流的な運動に起因する速度分散は $164 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$ でいずれもかなり小さいことがわかった²²⁾。ペルセウス座銀河団も天球面上でガススロッシング現象が起きていると考えられている。この成果は間違いなくガススロッシング現象や銀河団衝突時のガスの運動の解明につながるはずだ。Abell 1835 銀河団の中心領域でわれわれが得た速度の上限値もこれらと整合しており、ガススロッシング現象が起きていても、大きな乱流は生じないのかもしれない。X線マイクロカロリメーターの能力を見事に実証した「ひとみ」だが、他の銀河団を観測することなく喪失してしまった。痛恨の極み。安全な運用のもと「X線天文衛星代替機」による多数の銀河団の銀河団高温ガスの速度場の観測により、ガススロッシング現象やクールコアの起源の解明が飛躍的に進むことを期待したい。

このように、新しい望遠鏡を用いて新しい手法で観測すると、必ず新しい結果が生まれてくる。電波望遠鏡 Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) による Sunyaev-Zel'dovich (SZ) 効果の観測も、その典型になると期待されている。SZ効果は銀河団高温ガスと宇宙マイクロ波背景放射との相互作用により生じる²³⁾。SZ効果は、X線と比較すると、特に遠方銀河団における高温ガスの圧力分布を直接測定するのに適している。しかし、非常に微弱な現象であるため、高角度分解能の観測を実現するのは従来困難だった。実際、Abell 1835 銀河団でもSZ効果の観測は行われてきたが、従来の空間分解能では、中心に存在するAGNの放射による汚染を取り除ききれなかった²⁴⁾。この状況を打開できる能力をもつのがALMAである。筆者らはALMAを用いて初めて5秒角の角度分解能でSZ効果を観測できることを、他の銀河団に対してであるが実証している²⁵⁾。X線とSZ効果での高精度観測の組み合わせによって、今後さらにクールコアの謎に迫っていきたい。

謝 辞

本稿の科学的な内容については、筆者が2017年に出版した論文¹⁵⁾を元に記載しています。本研究はJSPS科研費15K17610 (SU), 25400236 (TK), 24105007 (TD)の助成を受けたものです。最後になりますが、本稿の執筆を進めていただいた馬場彩編集委員に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Mitchell R. J., et al., 1976, MNRAS 175, 29
- 2) 北山哲, 2003, 天文月報 96, 554
- 3) Tamura T., et al., 2001, A&A 365, L87
- 4) Peterson J. R., et al., 2001, A&A 365, L104
- 5) 牧島一夫, 池辺靖, 2004, 天文月報 97, 6
- 6) Ota N., et al., 2006, ApJ 640, 673
- 7) Makino N., Sasaki S., Suto Y., 1998, ApJ 497, 555
- 8) Ebeling H., et al., 1998, MNRAS 301, 881
- 9) Churazov E., et al., 2003, ApJ 590, 225
- 10) Simionescu A., et al., 2012, ApJ 757, 182
- 11) Ichinohe Y., et al., 2015, MNRAS 448, 2971
- 12) Ghizzardi S., et al., 2014, A&A 570, A117
- 13) Clarke T. E., et al., 2004, ApJ 616, 178
- 14) Blanton E. L., et al., 2011, ApJ 737, 99
- 15) Ueda S., Kitayama T., Dotani T., 2017, ApJ 837, 34
- 16) Sanders J. S., et al., 2010, MNRAS 402, L11
- 17) Sanders J. S., 2006, MNRAS 371, 829
- 18) Markevitch M., Vikhlinin A., 2007, PhR 443, 1
- 19) ZuHone J. A., et al., 2010, ApJ 717, 908
- 20) Roediger E., et al., 2011, MNRAS 413, 2057
- 21) McNamara B. R., et al., 2006, ApJ 648, 164
- 22) Hitomi Collaboration, 2016, Nature 535, 117
- 23) Sunyaev R. A., Zel'dovich Y. B., 1972, Comments on Astrophysics and Space Physics 4, 173
- 24) Korngut P. M., et al., 2011, ApJ 734, 10
- 25) Kitayama T., et al., 2016, PASJ 68, 88

Embedded Spiral Patterns in the Cool Core of Clusters of Galaxies—Hints to Origin of Cool Core—

Shutaro UEDA, Tetsu KITAYAMA, and Tadayasu DOTANI

ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara 252-5210, Japan

Abstract: Most of relaxed clusters have cool cores with a typical size of 100 kpc. The temperature of intracluster medium (ICM) in the cool cores is lower than that in the outskirts. The origin and evolution of the cool cores are still unclear. To tackle these problems, we study a massive galaxy cluster Abell 1835, which is one of typical relaxed clusters. By using the data of the deep observations with *Chandra X-ray Observatory*, we find distinctive spiral patterns with a radius of 70 kpc in a residual image subtracted by a two-dimensional ellipse model of X-ray surface brightness. This is the smallest size in clusters that are known to have a similar spiral pattern. The properties of the ICM in the spiral patterns indicate that the temperature and density in a positive excess region is lower and higher than those in a negative excess region, respectively. In contrast, no significant difference is found in the pressure, which suggests that the ICM in the two regions of the spiral pattern is close to or in pressure equilibrium. These results indicate that Abell 1835 is experiencing gas sloshing induced by an off-axis minor merger. This may indicate that the stirring motion producing the spirals transports a fraction of the cool gas out to larger radii and the hot gas into smaller radii. This heat injection may contribute to stability of the cool core.